

# جاذب متخلخل صوتی با المان رزونانسی محلی تعبیه شده در آن

رضا برزگر پرائی\*  
 کارشناسی ارشد مهندسی صدا  
 دانشگاه صدا و سیما  
 barzegar@iribu.ac.ir

معصومه شفیعیان  
 دکترای تخصصی  
 استادیار دانشگاه صدا و سیما  
 shafieian@alumni.iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲

## چکیده

جاذب‌های صوتی در کاربری‌های مختلف مانند مکان‌هایی که نیاز به کنترل نوفه<sup>۱</sup> دارند و یا احتیاج به مشخصه‌های آکوستیکی مطلوب دارند، مورد نیازند. جاذب‌های صوتی سنتی در محدوده فرکانسی پایین ناکارآمد بوده و بهره‌وری بالایی ندارند و برای دریافت میزان جذب بالا در محدوده فرکانس پایین لازم است ضخامت بالایی از این مواد را مورد استفاده قرار داد که با توجه به محدودیت‌های موجود در ساخت و کمبود فضا عملاً استفاده از جاذب‌های سنتی با هدف جذب صداهایی با فرکانس پایین امکان‌پذیر نیست. یکی از روش‌های موجود برای جذب صوتی بالا در محدوده فرکانس پایین به ازای ضخامت پایین جاذب، استفاده از فراموادهای<sup>۲</sup> آکوستیکی است. فراموادهای آکوستیکی به دلیل مشخصه‌های صوتی ویژه‌ای نظیر انتقال، جذب و جهت‌گیری که در مواد طبیعی موجود نیست، شناخته می‌شوند. این ویژگی‌ها به واسطه ساختار تکرارپذیر و پیکربندی‌های مختلف فراموادها به وجود می‌آیند. در این مطالعه برای غلبه بر مشکل جذب در فرکانس‌های پایین، مشخصه‌های جذب ساختارهای متخلخل مبتنی بر فوم با استفاده از بلوک‌های رزونانس محلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. عناصر تعبیه شده در مواد جاذب با اشکال و خواص مختلف با روش المان محدود (توسط نرم‌افزار کامسول<sup>۳</sup>) برای بهبود جذب صدا، به ویژه در محدوده فرکانس پایین، مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد که سیلندرهای اعمالی پر شده از هوا با شعاع بیرونی زیاد و ضخامت کم در درون جاذب متخلخل باعث بهبود میزان جذب صدا در فرکانس‌های پایین شده‌اند.

**واژگان کلیدی:** ضریب جذب صوتی، جاذب متخلخل، المان رزونانس محلی، روش المان محدود

## ۱. مقدمه

مواد به علت ماهیت خود، در فرکانس‌های میانی و بالا جاذب‌های قوی هستند، ولی کارایی لازم را در محدوده فرکانسی پایین ندارند و باید ضخامت زیادی را به کار گرفت تا میزان ضریب جذب در فرکانس‌های پایین را افزایش داد.

در روش کنترل غیرفعال نوفه، از جاذب‌های صوتی برای جذب صدای تابشی و کاهش بازتاب صدا در محیط‌های بسته و یا فضای اطراف منبع صوت استفاده می‌کنند. جاذب‌های متخلخل<sup>۴</sup> از متداول‌ترین نوع جاذب صوتی هستند. این نوع

زیادی از نمونه‌های مواد متخلخل و استفاده از منحنی برای به‌دست آوردن رابطه‌ای بین اثر امپدانس مشخصه و عدد موج انتشار با مقاومت در برابر جریان بوده است [۱]. روش دوم برای مدل‌سازی جاذب متخلخل، فرموله کردن مسأله با استفاده از روش نیمه تحلیلی است. این روش نسبت به مدل‌های تجربی نسبتاً پیچیده‌تر است. از آنجایی که واضح است که در بیشتر جاذب‌های متخلخل، نمی‌توان تمام پارامترهای موجود در مدل را به صورت تحلیلی استخراج کرد، لذا همین امر موجب می‌شود تا اجرا و پیاده‌سازی روش نیمه‌تحلیلی سخت گردد. به خصوص اینکه تخمین فاکتورهای مرتبط با اشکال منافذ به جز در روش تجربی کار دشواری است. در این مطالعه از روش تجربی و با کمک ضرایب دلنی و بیزلی جاذب متخلخل مدل‌سازی شده است. مدل تجربی برای جاذب متخلخل، مبتنی بر مدل دلنی و بیزلی است و ضرایب مربوطه برای تعریف امپدانس مشخصه هر لایه متخلخل است [۲]. معادله امپدانس مشخصه لایه متخلخل ( $Z_i$ ) و ثابت انتشار مشخصه  $k_i$  به ترتیب زیر نشان داده شده‌اند:

$$Z_i = Z_0(1 + c_1 X^{c_2} - j c_3 X^{c_4}) \quad (1)$$

$$k_i = \frac{\omega}{c_0} (c_5 X^{c_6} + j(1 + c_7 X^{c_8})) \quad (2)$$

عبارت  $X$  یک پارامتر تجربی بدون هیچ معنای فیزیکی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X = \frac{\rho_0 f}{\sigma} \quad (3)$$

$\rho_0$  تراکم هوا،  $f$  فرکانس و  $\sigma$  مقاومت در برابر جریان مربوط به لایه می‌باشند. مقادیر  $C_1$  تا  $C_8$  نیز مربوط به ضرایب دلنی و بیزلی هستند که در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

اگر جذب در فرکانس‌های پایین نیز لازم باشد، بایستی به روشی مثلاً تغییر شکل جاذب، چیدمان چندلایه‌ای و یا استفاده از فرامواد، ویژگی آکوستیکی جذب این مواد بهینه شود.

استفاده از فراموادهای آکوستیکی موجب شده است که با استفاده از همان مواد سنتی ولی با آرایش و چیدمانی متفاوت به مشخصه‌های جذب بهتری دست یابیم و از طرفی دیگر این کار مزایایی نظیر کاهش ضخامت و هزینه ساخت را به همراه خواهد داشت. هدف از این مطالعه نیز بررسی یک ساختار جدید از جاذب صوتی که تحت عنوان فراماده آکوستیکی قرار می‌گیرد، است. در این مطالعه با اعمال بلوک استوانه‌ای رزونانس محلی به جاذب متخلخل مبتنی بر فوم قصد داریم تا به تجزیه و تحلیل این سازه پردازیم و با تغییرات المان‌هایی نظیر جنس بلوک‌ها، قطر بلوک‌ها، ضخامت بلوک‌ها، سایز بلوک‌ها و ماده درون بلوک‌ها به بهترین نتیجه و بالاترین میزان ضریب جذب دست پیدا کنیم.

در ابتدا به بیان روش تحلیلی و ریاضیاتی محاسبه ضریب جذب می‌پردازیم. سپس در خصوص مدل طراحی شده به تحلیل آن از روش المان محدود به کمک نرم‌افزار کامسول می‌پردازیم.

## ۲. مباحث کلی

در این بخش به ارائه مباحث کلی در خصوص مکانیزم جذب و محاسبه ضریب جذب پرداخته می‌شود.

### ۲-۱. مدل‌سازی انتشار صوتی جاذب متخلخل

مدل‌سازی انتشار صدا در یک جاذب متخلخل کار ساده‌ای نیست. اساساً دو روش وجود دارد که بیشتر مفید هستند. روش اول یک روش کاملاً تجربی است که در ابتدا توسط دلنی<sup>۵</sup> و بیزلی<sup>۶</sup> ارائه شده است و بر اساس اندازه‌گیری تعداد

جدول ۱. ضرایب دلنی و بیزیلی [۱]

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
۰/۰۵۷۱۰	۰/۷۵۴۰۰	۰/۰۸۷۰۰	۰/۷۳۲۰۰	۰/۱۸۹۰۰	۰/۵۹۵۰۰	۰/۰۹۷۸۰	-۰/۷۰۰۰۰

عددی، روش المان محدود<sup>۷</sup> اغلب در آکوستیک استفاده می‌شود. در این مطالعه، روش المان محدود برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های جذب صدا در ساختارهای جذب صدا استفاده می‌شود.

### ۳-۱. اندازه‌گیری لوله امپدانس

برای بسیاری از محققان تنها اندازه‌گیری مهم این است که ضریب جذب تصادفی در یک اتاق واخنا را به دست آورند. پیش‌بینی ضریب جذب تصادفی مشکل است و در نتیجه لازم است برای اندازه‌گیری ضریب جذب مواد از یک محیط کنترل‌شده‌تر به منظور مقایسه مستقیم بین تئوری و اندازه‌گیری‌ها استفاده شود. محیط کنترل‌شده‌تری که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، لوله امپدانس است که امپدانس برخورد نرمال و جذب را تعیین می‌کند.

لوله موج ایستاده هم قادر به اندازه‌گیری ضریب جذب برخورد نرمال و هم امپدانس سطحی است. این یک روش بسیار مفید است زیرا ضریب جذب و امپدانس را تحت شرایط مشخص و کنترل‌شده اندازه‌گیری می‌کند. در نتیجه، در اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی برای مواد جذبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش مزیتی دارد که فقط نیاز به نمونه‌های کوچک با قطری در حدود چند سانتی‌متر دارد. همین امر باعث ایده‌آل شدن این شیوه برای توسعه‌دهندگان مواد جذب شده است و باعث به‌وجود آمدن یک روش جایگزین به جای ساخت نمونه‌های بزرگ برای آزمون‌های اتاق واخنا، که دشوار و گران هم هستند شده است.

مزیت کلیدی و نهایی این روش این است که روش لوله امپدانس<sup>۸</sup> را می‌توان با یک دستگاه نسبتاً ساده و در یک اتاق معمولی انجام داد و به آزمایشگاه‌های تخصصی نیاز ندارد.

برای به‌دست آوردن امپدانس سطحی لایه مربوطه ( $Z_S$ )، معادله زیر باید مورد استفاده قرار گیرد، جایی که  $l$  ضخامت ماده جاذب است:

$$Z_S = Z_0 \coth(k_i l) \quad (۴)$$

برای رسیدن به ضریب جذب، عامل بازتاب باید شناخته شود که آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$R = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} \quad (۵)$$

در نهایت ضریب جذب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (۶)$$

### ۲-۲. جاذب‌هایی با المان‌های اعمال شده در آنها

برای جذب صدا، مواد متخلخل به‌طور گسترده‌ای در انواع مختلف و کارکردهای متفاوت استفاده می‌شوند. اما هنگامی که به این جاذب‌ها یک دیواره پشت سفت اعمال شود، تنها زمانی مؤثر خواهند بود که ضخامت آنها بیش از یک‌چهارم طول موج صدا باشد [۳]. این امر موجب الزام استفاده از لایه‌های ضخیم‌تر برای جذب فرکانس‌های پایین خواهد شد. یک روش سنتی و رایج برای غلبه بر این مشکل، استفاده از ساختارهای چند لایه است. روش دیگری نیز وجود دارد و آن هم اعمال یک مجموعه متناوب از رزوناتور در درون یک لایه ساده از جاذب‌های متخلخل است که باعث کارآمدتر شدن جاذب خواهد شد [۱۲-۴]، در عین حال که نیاز به ضخیم‌تر کردن لایه جاذب و یا حتی استفاده از ساختار چندلایه نیز نخواهد بود.

### ۳. مدل‌سازی به روش المان محدود

در ساده‌ترین شکل، روش‌های حل ریاضی را می‌توان به دو دسته تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی کرد. در حوزه روش‌های

مشکلات این روش زمانی به وجود می‌آید که مشخصه‌های جذب نمونه‌های کوچک معرف و بیانگر رفتار نمونه بزرگ‌تر نیستند، همان‌طور که با بسیاری از جاذب‌های رزونانسی نیز اتفاق می‌افتد. به همین دلیل، این روش بیشتر در جاذب‌های متخلخل واکنش محلی مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳-۲. روش ماتریس انتقال

روش ماتریس انتقال<sup>۱</sup>، معمولاً در مسائل آکوستیکی برای به‌دست آوردن مشخصه‌های جذب جاذب‌های آکوستیکی چندلایه استفاده می‌شود. در این مطالعه، روش ماتریس انتقال برای تعیین امپدانس و مشخصه‌های جذب برای جاذب صوتی مربوطه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماتریس انتقال، امپدانس سطحی لایه‌ها را با استفاده از امپدانس مشخصه لایه ( $Z_l$ ) و ثابت انتشار ( $k$ ) تعیین می‌کند. فشار آکوستیکی موج صفحه‌ای در حال حرکت در هوا به فرم زیر است:

$$p = A e^{j\omega\left(t - \frac{x}{c_0}\right) - kx} \quad (7)$$

$A$  دامنه ثابت،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $c_0$  سرعت صدا در هوا و  $k$  ثابت تضعیف (میرایی) می‌باشند. فشار آکوستیکی  $p(0)$  در  $x=0$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$p(0) = A e^{j\omega t} \quad (8)$$

در  $x=0$  فشار موج صفحه‌ای را به عنوان یک تابع از  $x$  می‌توان با استفاده از معادلات ۷ و ۸ نوشت:

$$p = p(0) e^{kx} \quad (9)$$

سرعت جریان را نیز می‌توان مشابه فشار نوشت:

$$v = v(0) e^{kx} \quad (10)$$

$k$  ثابت انتشار است و به صورت حاصل جمع مختلط ثابت تضعیف (میرایی) و ثابت فازی ( $\beta$ ) تعریف می‌شود:

$$k = \kappa + j\beta \quad \text{و} \quad \beta = \frac{\omega}{c_0} \quad (11)$$

برای به‌دست آوردن فرمول ماتریس انتقال، لایه  $l$  را با امپدانس مشخصه  $Z_1$  فرض می‌کنیم. امپدانس آکوستیکی سطحی در پایین لایه توسط  $Z_1$  در  $x=0$  از نتایج به‌دست آمده از لایه قبلی محاسبه می‌شود، امپدانس آکوستیکی سطحی  $Z_2$  در  $x=l$  از  $Z_1$  و  $Z_1$  به‌دست می‌آید. موج صفحه‌ای ورودی  $P_i$  و موج صفحه‌ای بازتابیده شده در مرز  $x=0$   $P_r$  است.

امپدانس (امپدانس آکوستیکی ویژه<sup>۲</sup>) به عنوان تابعی از  $x$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z(x) = \frac{p(x)}{v(x)} \quad (12)$$

در لایه  $l$ ، فشار در هر نقطه  $x$  را می‌توان به وسیله انطباق فشار ناشی از امواج تابیده شده و بازتابیده شده به صورت زیر تعریف کرد:

$$p(x) = P_i e^{k(l-x)} + P_r e^{-k(l-x)} \quad (13)$$

به‌طور مشابه، سرعت ذره در هر نقطه  $x$  به صورت مجموع سرعت ذرات امواج تابیده شده و بازتابیده شده محاسبه می‌شود:

$$v(x) = \frac{P_i}{Z_l} e^{k(l-x)} - \frac{P_r}{Z_l} e^{-k(l-x)} \quad (14)$$

در مرز  $x=l$  داخل لایه  $l$ ، امپدانس سطحی  $Z_2$  به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$Z_2 = \frac{p(l)}{v(l)} \quad (15)$$

همچنین، فشار کل و سرعت ذره‌ای موج تابیده شده و بازتابیده شده در  $x=l$  به صورت زیر می‌باشند:

$$p(l) = P_i + P_r(l) \quad (16)$$

$$v(l) = \frac{P_i}{Z_l} - \frac{P_r}{Z_l} \quad (17)$$

به عنوان یک مورد خاص، زمانی که هر لایه به یک دیوار  
 سفت متصل شود، امپدانس  $Z_2$  بی‌نهایت می‌شود.  
 هنگامی که  $Z_2 \rightarrow \infty$ ، امپدانس در بالای لایه را می‌توان  
 به صورت زیر محاسبه کرد:

$$Z_1 = Z_l \coth(kl) \quad (23)$$

در این مطالعه، تابع انتقال به صورت  $H_{12}$ ، نسبت فشار  
 میکروفون در موقعیت ۱ به موقعیت ۲، که می‌توان به فرم  
 $p_2/p_1$  نوشت، تعریف می‌شود. با توجه به تعریف،  $H_{12}$   
 یک مقدار مختلط می‌باشد. این نسبت می‌تواند با اندازه‌گیری  
 مقادیر فشار صدا برای فرکانس‌های مورد نیاز توسط هر نوع  
 روش آزمایشگاهی که شامل لوله امپدانس و مواد نمونه و یا  
 مدل المان محدود است محاسبه شود. این روش در شکل ۱  
 نمایش داده شده است.  
 بنابراین امپدانس آکوستیکی سطحی لایه از طریق معادله  
 زیر به دست می‌آید [۳]:

$$Z_s = \frac{H_{12} \sin[k(Lx+Dx)] - \sin(kLx)}{\{\cos(kLx) - H_{12} \cos[k(Lx+Dx)]\}} \quad (24)$$

پس از به دست آوردن امپدانس آکوستیکی سطحی، مشابه  
 روش‌های یاد شده در محاسبات تئوری، ابتدا ضریب بازتاب  
 $R$  را محاسبه کرده و سپس مقدار ضریب جذب  $\alpha$  را به دست  
 می‌آوریم.

با استفاده از معادلات فوق، می‌توان مقدار موج بازتابیده شده  
 را محاسبه کرد:

$$P_r = P_i \frac{Z_2 - Z_l}{Z_2 + Z_l} \quad (18)$$

با قرار دادن معادله ۱۸ در معادلات ۱۳ و ۱۴، فشار و سرعت  
 در  $x=0$  را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$p(0) = P_i e^{kl} + P_i \frac{Z_2 - Z_l}{Z_2 + Z_l} e^{-kl} \quad (19)$$

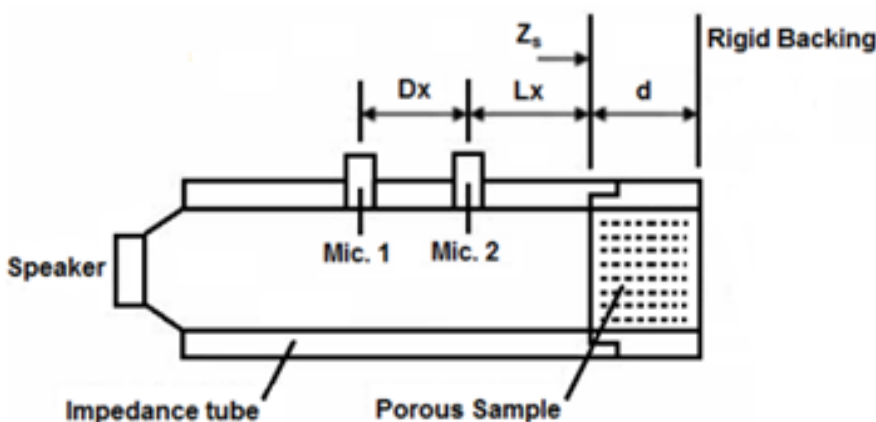
$$v(0) = \frac{P_i}{Z_l} e^{kl} + \frac{P_i Z_2 - Z_l}{Z_l Z_2 + Z_l} e^{-kl} \quad (20)$$

در مرز  $x=0$  داخل لایه  $l$ ، امپدانس سطحی  $Z_1$  را نیز  
 می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$Z_1 = \frac{p(0)}{v(0)} \quad (21)$$

با قرار دادن معادلات ۱۹ و ۲۰ در معادله ۲۱ می‌توان امپدانس  
 سطحی  $Z_1$  در  $x=l$  را به صورت تابعی از امپدانس سطحی  
 $Z_2$  در  $x=0$  امپدانس لایه  $Z_l$  و ثابت انتشار  $k$  نوشت:

$$Z_1 = Z_l \frac{Z_2 \cosh(kl) - Z_l \sinh(kl)}{Z_2 \sinh(kl) + Z_l \cosh(kl)} \quad (22)$$

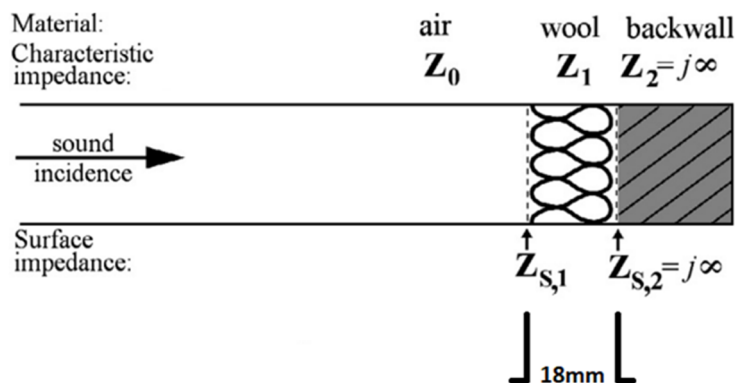


شکل ۱. ساختار شماتیک یک لوله امپدانس آزمایشگاهی

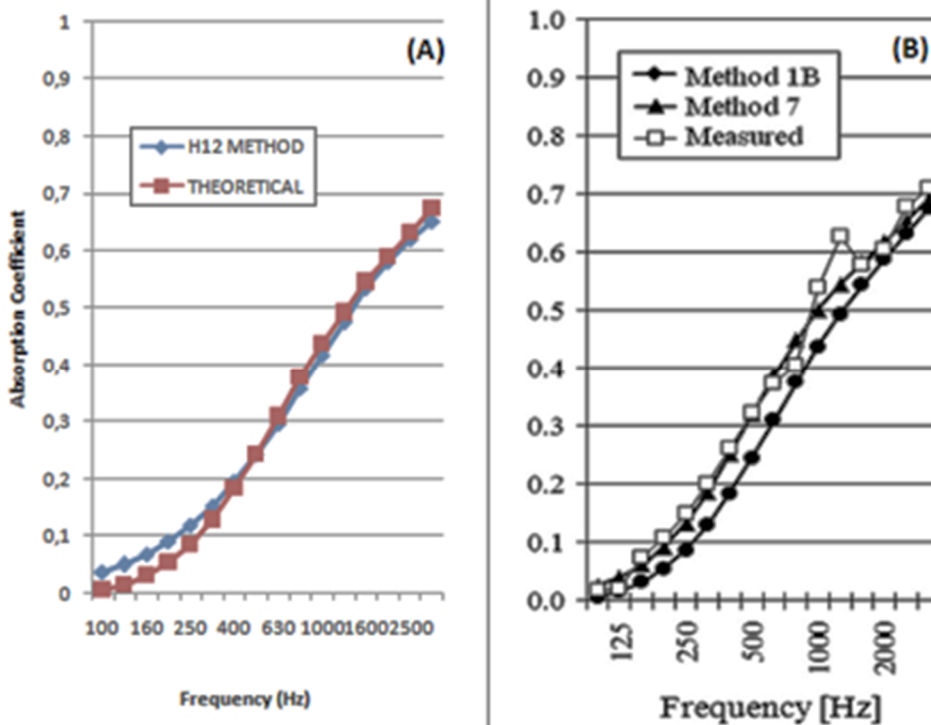
### ۳-۳. تولید مدل

قبل از تولید مدل المان محدود با رزونانس محلی گنجانده شده در آن، تنها یک جاذب که شامل چنین ساختاری است را مدل کرده و حل می‌کنیم تا مطمئن شویم روش انتخاب شده به درستی کار می‌کند. مدل مورد نظر یک جاذب متخلخل با مواد پشمی؛ دارای ضخامت ۱۸ میلی‌متر با دیواره

پشتی سخت است در شکل ۲ نمایش داده شده است [۲]. با استفاده از روش تابع انتقال، مقادیر فشار در مدل المان محدود ایجاد شده در نرم‌افزار کامسول به‌دست آمده و سپس به کمک آنها به محاسبه ضرایب جذب می‌پردازیم که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر شماتیک از تنظیمات [۳]



شکل ۳. (الف) ضرایب جذب به‌دست آمده از روش المان محدود و تئوری آن (ب) ضرایب جذب به‌دست آمده توسط اولیوا و هنگیستو [۳]

هندسه ساختار در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل یک لوله امپدانس و یک جاذب در انتهای آن با ضخامت ۵۰ میلی‌متر به همراه دیواره پشتی سفت است. پس از ایجاد هندسه کلی ساختار، بلوک‌های سیلندری با مشخصه‌های مختلف در جاذب متخلخل تعبیه شدند. در خصوص مشخصات مواد به کار رفته در محیط کلی مدل طراحی شده، هوا با چگالی  $1/204$  گرم بر سانتی‌مترمکعب و سرعت صوت در هوا به اندازه  $344$  متر بر ثانیه تعریف شده‌اند. جاذب متخلخل توسط ضرایب دلنی و بی‌زلی تعریف شده است. مقاومت در برابر جریان،  $215000$  پاسکال در ثانیه بر متر مربع تعریف شده است. امواج صفحه‌ای ورودی عمود بر جاذب و با دامنه فشار یک پاسکال اعمال شده است. هنگام تولید مدل، به جز شرایط مرزی منبع، همه مرزهای بیرونی دیگر به صورت دیواره مرزی سخت تعریف می‌شوند که امکان عبور صدا از دیواره لوله امپدانس و دیواره پشتی سفت را در شبیه‌سازی نمی‌دهد.

در این مطالعه از المان مثلثی با ابعاد مختلف، جهت مش‌بندی استفاده شده است. با توجه به مطالعه انجام شده قبلی، بهترین اندازه ممکنه برای المان مش‌بندی، استفاده از حداقل  $6$  المان مش‌بندی به ازای کوچک‌ترین طول موج موجود است [۱۳]. در مورد مدل بررسی شده در این مطالعه، بالاترین مقدار فرکانس  $3150$  هرتز است که به معنی کوچک‌ترین طول موج تقریباً  $109/2$  میلی‌متر است و با توجه به محدودیت گفته شده در خصوص سایز مش، بزرگ‌ترین اندازه مش باید  $18/2$  میلی‌متر باشد. در این مطالعه، بر اساس رابط کاربری نرم‌افزار کامسول، مش با اندازه نرمال انتخاب شد که از  $13/4$  میلی‌متر تا حداکثر اندازه مش که در مدل وجود دارد را شامل می‌شود.

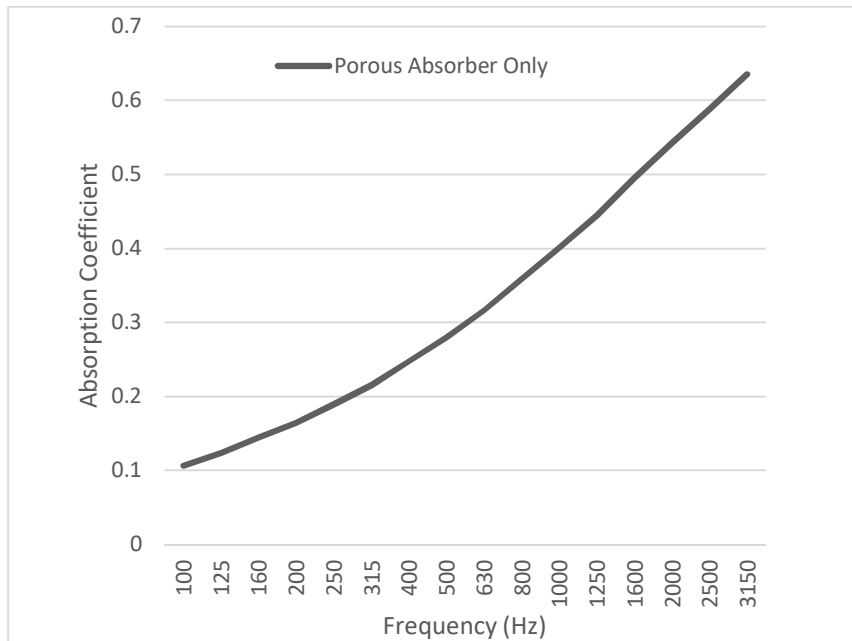
مدل ارائه شده در محدوده فرکانسی  $100$  هرتز تا  $3150$  هرتز و در فرکانس‌های باند یک‌سوم اکتاوی حل شده است. بعد از اینکه مدل حل شد، باید مقادیر فشار هر یک از میکروفون‌های قرار داده شده در لوله را که در شکل ۱ آمده، خواند. با استفاده از فشار به‌دست آمده برای هر میکروفون، به کمک روابط موجود که در بخش‌های قبل ارائه شدند، به سادگی می‌توان با یک جایگذاری ساده مقادیر جذب را به‌دست آورد.

#### ۴. نتایج

این بخش شامل مدل‌های تولید شده به صورت پارامتریک در محیط نرم‌افزاری و مشخصه‌های جذب حاصل شده است؛ همچنین به ارائه نتایج و اثرات متغیرهای پارامتریک و هندسی پرداخته می‌شود.

##### ۴-۱. جاذب متخلخل بدون هرگونه المان اعمالی

قبل از اضافه کردن بلوک‌های سیلندری و مشاهده اثرات به‌وجود آمده در ویژگی‌های جذب، به بررسی جاذب متخلخل که هیچ المانی در آن تعبیه نشده، پرداخته شده است. یک موج صفحه‌ای به منظور شبیه‌سازی لوله امپدانس به جاذب متخلخلی که دارای ضخامت  $50$  میلی‌متر است وارد می‌شود. منحنی مربوط به ضرایب جذب ماده متخلخل به‌دست آمده در شکل ۴ قابل مشاهده است. نتایج به‌دست آمده کاملاً نزدیک به جاذب متخلخلی است که برای تأیید نتایج در بخش قبلی، یعنی شکل ۳ مدل‌سازی شده است. با توجه به منحنی مورد نظر، مشخص است که با افزایش فرکانس صدا، ضرایب جذب افزایش می‌یابند که این امر در خصوص جاذب‌های متخلخل بدیهی است.

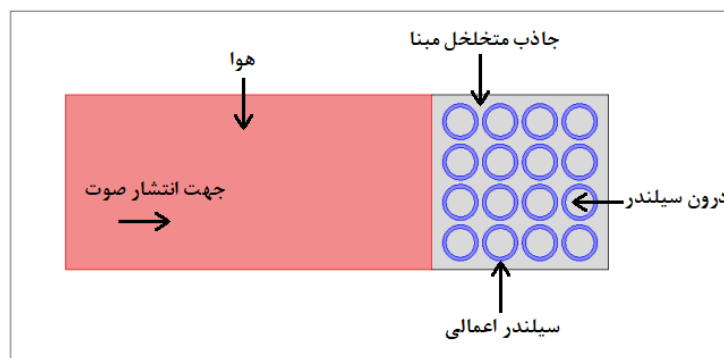


شکل ۴. ضرایب جذب محیط متخلخل با ضخامت ۵۰ میلی‌متر

#### ۴-۲. اعمال المان سیلندری آلومینیومی به جاذب متخلخل

همان‌طور که در ابتدای مقاله بیان شد، هدف از این تحقیق، بررسی جاذب متخلخلی است که درون آن از سیلندرهایی اعمالی استفاده شده است. با اعمال سیلندرها در درون جاذب متخلخل مبنا، فضای درونی سیلندر نیز حائز اهمیت خواهد

شد، لذا جنس ماده پرکننده درون سیلندر نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. در ابتدا، قسمت داخلی لوله‌های سیلندری با فومی پر شده است که سازنده ماده جاذب متخلخل مبنا است؛ و سپس، لوله‌ها از ماده فوم خالی شده و هوا درون آن قرار گرفته که در بخش زیر ارائه و نمای شماتیک مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. سیلندرها با آرایه  $4 \times 4$  به جاذب اعمال می‌شوند.

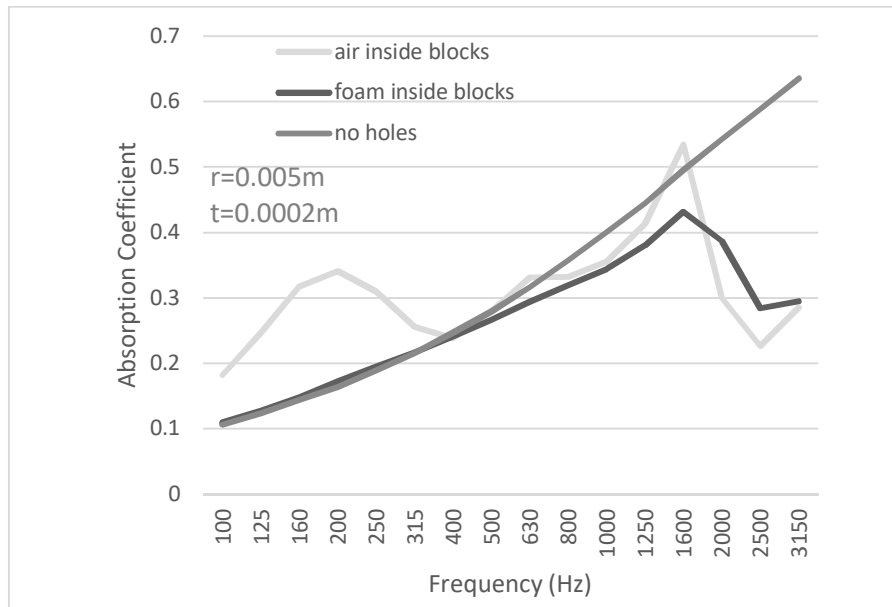


شکل ۵. تصویر شماتیک مدل

وجود هوا در سیلندرها نسبت به وجود فوم در آنها افزایش بیشتری در میزان جذب به ویژه در فرکانس‌های کمتر از ۴۰۰ هرتز را دارد.

منحنی شکل ۶ که مربوط به میزان جذب در جاذب با سیلندرهایی اعمالی با قطر بیرونی یک سانتی‌متر و ضخامت ۰/۲ میلی‌متر در دو وضعیت پر شده از هوا و فوم به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. به وضوح قابل مشاهده است که



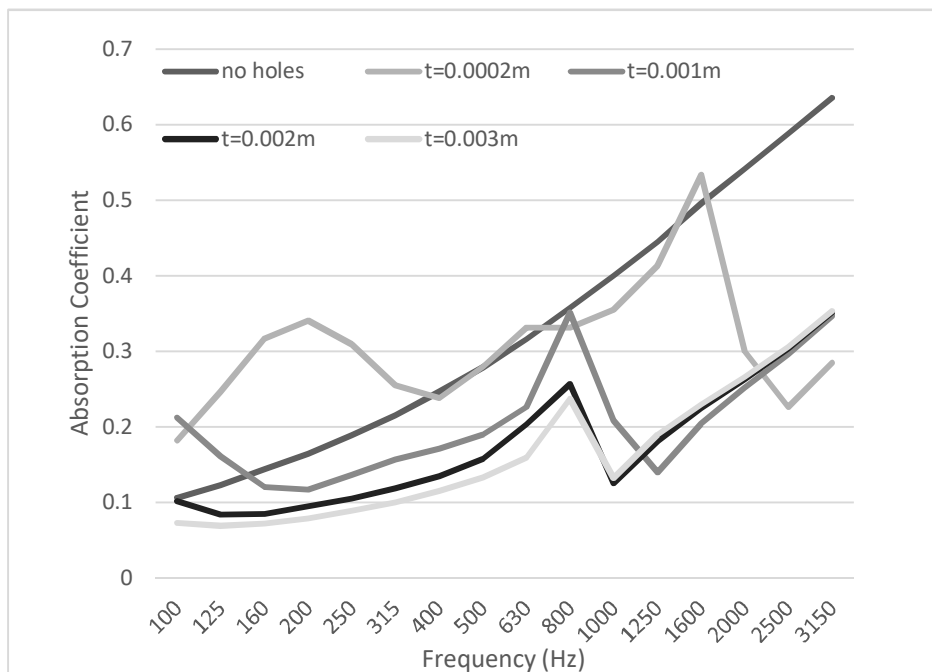


شکل ۶. ضرایب جذب مربوط به جاذب در دو حالت سیلندرهای پر شده از هوا و فوم با ضخامت و قطر بیرونی ثابت

مربوط به آن قابل مشاهده می‌باشد. به وضوح دیده می‌شود که با ضخامت‌های ۱، ۲، ۳ و ۰/۲ میلی‌متری، کاهش میزان ضخامت موجب جذب بالاتر می‌شود. ضخامت ۰/۲ میلی‌متر (باریک‌ترین ضخامت) بهترین عملکرد را به خصوص در فرکانس‌های پایین‌تر و بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ هرتز نشان می‌دهد.

### ۳-۴. اعمال ضخامت‌های مختلف برای سیلندرهای اعمالی

در این مدل، لوله‌ها با هوا پر شده و در جاذب متخلخل تعبیه شدند. همان آرایه مشابه و با قطر بیرونی ثابت اعمال می‌شود. ضرایب به دست آمده در این حالت در شکل ۷ نیز منحنی

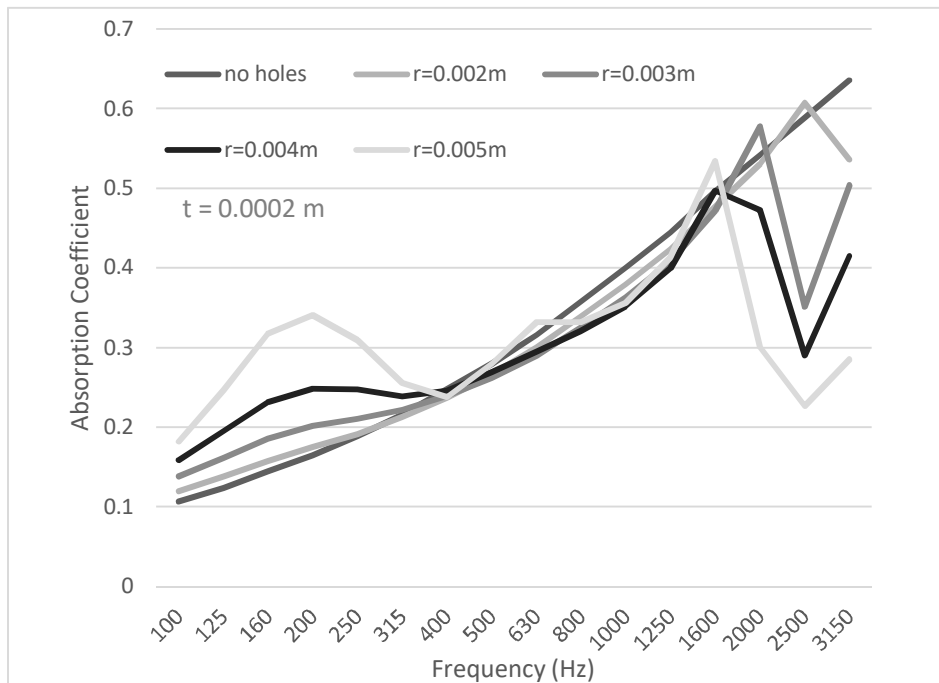


شکل ۷. ضرایب جذب برای المان‌های اعمالی پر از هوا با قطر بیرونی ۱ سانتی‌متر با مقادیر مختلف ضخامت

#### ۴-۴. اعمال قطرهای بیرونی مختلف برای سیلندرهای اعمالی

در مدل قبلی، دیده می‌شود که کارایی لوله به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر (باریک‌ترین ضخامت) نسبت به ضخامت‌های دیگر بیشتر بوده است. در این بخش به طراحی مدلی می‌پردازیم

که دارای ضخامت مشابه و قطرهای بیرونی متفاوت است تا بتوان میزان تأثیرگذاری آن را بر مشخصه‌های جذب مشاهده نمود. نتایج نشان داد که کارآمدترین نوع، ساختار با بزرگ‌ترین قطر بیرونی (یک سانتی‌متر) است. ضرایب جذب مربوط به این بخش در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. ضرایب جذب برای قطرهای بیرونی مختلف با ضخامت ثابت ( $t = 0.2\text{mm}$ )

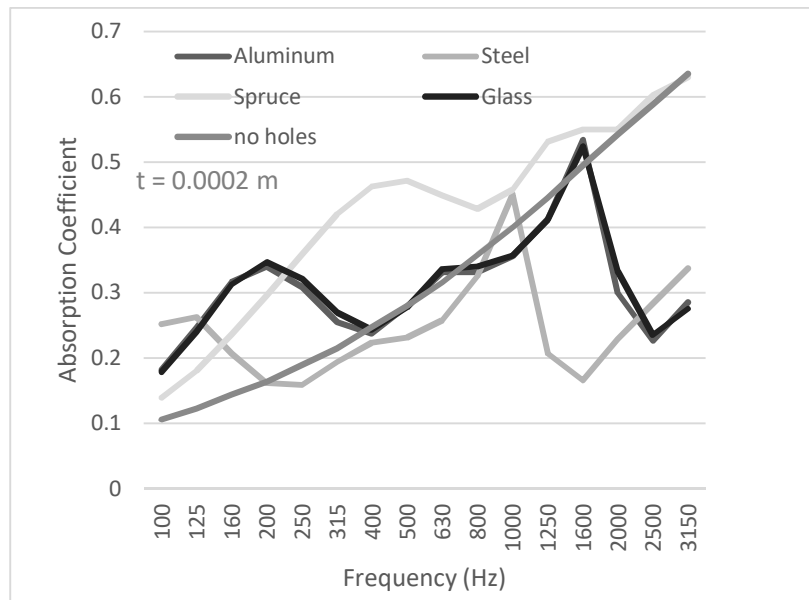
#### ۴-۵. اعمال مواد مختلف برای سیلندرهای اعمالی با ضخامت ثابت

دیده شد که بهترین نتایج برای محدوده فرکانس پایین از نظر مشخصه‌های جذب در جاذب‌هایی که دارای پوشش‌های نازک‌تر با قطر بزرگ‌تر بوده‌اند حاصل شده است. به همین ترتیب تغییرات هندسی نیز با استفاده از مواد دیگر مطابق با جدول ۲ به جای آلومینیوم برای سیلندر به منظور مشاهده اینکه آیا ممکن است نتایج بهبود یابند و یا خیر، اعمال

شده‌اند. در این گام، ضخامت سیلندر و قطر بیرونی آن ثابت نگه داشته شده‌اند و به ترتیب برابر با ۰/۲ میلی‌متر و ۱ سانتی‌متر هستند. در نتایجی که در شکل ۹ آمده است به وضوح مشاهده می‌شود که ماده استفاده شده از جنس چوب صنوبر، جذب بهتری را در باند فرکانسی ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ هرتز فراهم می‌کند، اما در فرکانس پایین و کمتر از ۲۵۰ هرتز، آلومینیوم و شیشه عملکرد بهتری نسبت به سایر مواد دارند.

جدول ۲. مقادیر سرعت و چگالی مواد استفاده شده

ماده	سرعت صوت (m/s)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
آلومینیوم	۵۰۰۰	۲۷۰۰
استیل	۶۱۰۰	۷۸۵۰
سرب	۲۱۶۰	۱۱۳۴۰
شیشه	۳۹۶۲	۲۵۰۰
صنوبر	۵۲۷۸	۴۵۰



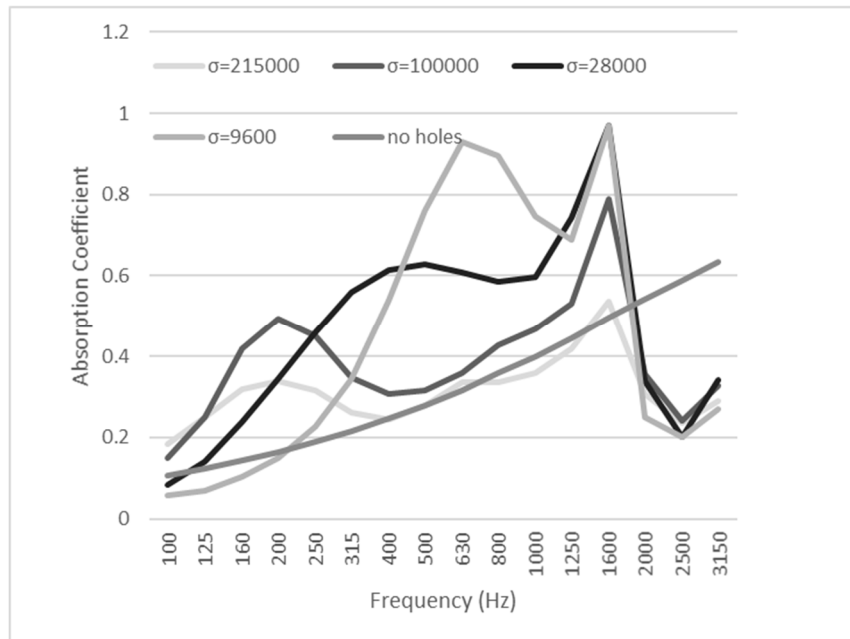
شکل ۹. ضرایب جذب سازه با مواد مختلف تعبیه شده در آن

که تغییر مقاومت در برابر جریان، تفاوت بسیار زیادی در مشخصه جذب در فرکانس‌های پایین‌تر از ۲۰۰۰ هرتز به وجود آورده است. به خصوص چوب صنوبر مشخصه جذب خوبی را به نسبت سایر مواد در باند فرکانسی ۲۵۰ هرتز تا ۱۰۰۰ هرتز فراهم کرده است. می‌توان ضرایب جذب را در شکل ۱۰ مشاهده کرد.

#### ۴-۶. استفاده از ماده متخلخل با مقادیر مختلف

##### مقاومت در برابر جریان

در این بخش برای بهبود کارایی جذب در باند فرکانسی پایین، مقادیر مختلف مقاومت در برابر جریان به همان مدل که در بخش قبلی وجود داشت، اعمال شد. نتایج نشان داد



شکل ۱۰. ضرایب جذب برای جاذب با مقادیر مختلف مقاومت در برابر جریان

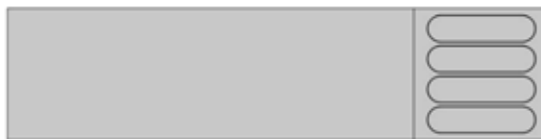
است. در اینجا، اتصالات بین المان‌ها به صورت کانال در نظر گرفته شده‌اند.

#### ۷-۴. استفاده از اتصالات درونی بین المان‌های اعمالی

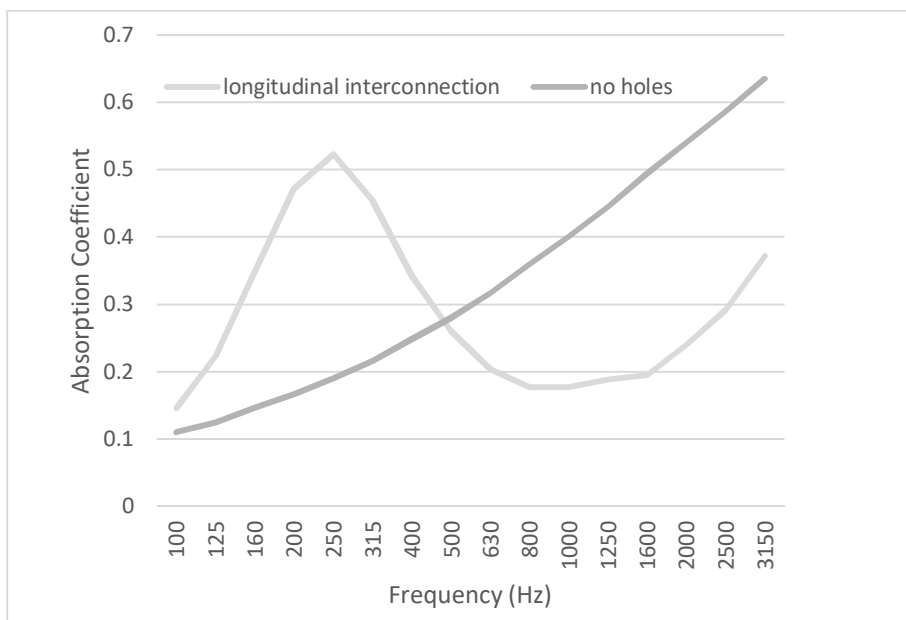
اتصالات درونی منجر به ایجاد حفره‌های بزرگ‌تر می‌شوند که دارای فرکانس‌های رزونانس پایین‌تر هستند و باعث جذب مؤثرتر در فرکانس پایین‌تر می‌شوند. در این بخش نتیجه اتصال درونی بین المان‌های رزونانسی نشان داده شده

#### ۷-۴-۱. اتصالات طولی

شماتیک المان‌هایی که اتصال درونی طولی دارند و ضرایب جذب به دست آمده از آنها به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده است.



شکل ۱۱. شماتیک المان‌های اعمالی اضافه شده به جاذب با اتصال طولی



شکل ۱۲. ضرایب جذب به دست آمده برای المان‌های اعمالی اضافه شده به جاذب با اتصالات طولی

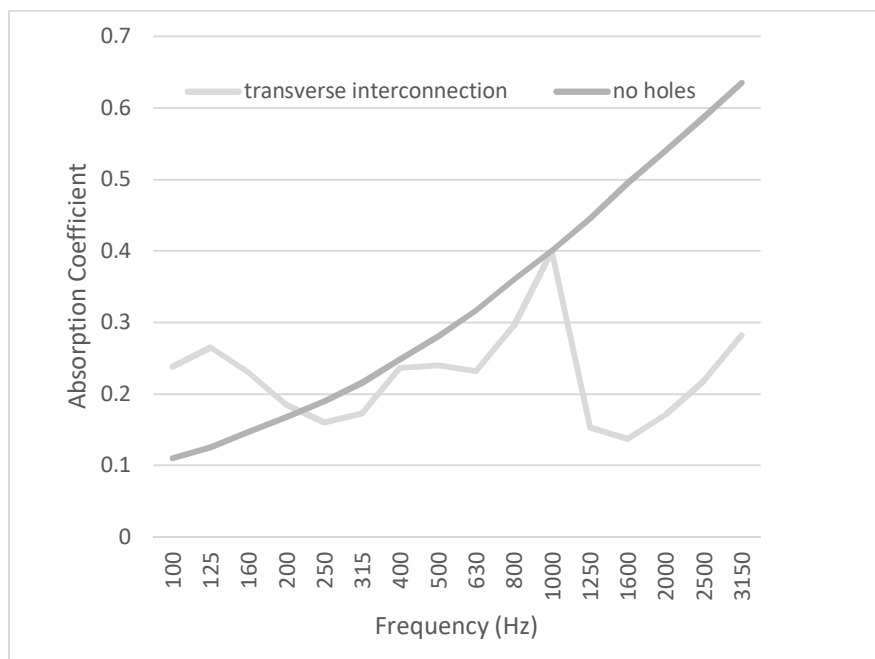
#### ۴-۷-۲. اتصالات عرضی

شماتیک المان‌هایی که اتصال درونی عرضی دارند در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. ضرایب جذب مربوط به آنها در شکل ۱۴ ارائه شده‌اند.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان جذب در فرکانس‌های میانی کاهش یافته است اما در محدوده فرکانس پایین به ویژه در فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ هرتز افزایش چشمگیری داشته است.



شکل ۱۳. شماتیک المان‌های اعمالی اضافه شده به جاذب با اتصال عرضی



شکل ۱۴. ضرایب جذب به دست آمده برای المان‌های اعمالی اضافه شده به جاذب با اتصالات عرضی

جمله کارهای صورت گرفته می‌توان به فعالیت‌های لاگاریگو<sup>۱۱</sup> و همکاران [۴-۷] اشاره کرد. با بررسی نتایج حاصل از این مطالعات می‌توان به منطبق بودن نتایج مقالات ذکر شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این تحقیق و دنبال کردن یک مسیر مشخص دست یافت؛ به خصوص در حالت اتصال طولی که می‌توان آن را مشابه کارهای گذشته دانست، چراکه دارای یک ردیف المان اعمالی بوده و منحنی حاصل از آن دارای تطابق کامل با کارهای مشابه در گذشته است. لازم به ذکر است که تفاوت‌های موجود از لحاظ عددی نیز به این دلیل است که اولاً مشخصات جاذب مرجع متفاوت بوده و ثانیاً کارهای گذشته فقط مربوط به یک استوانه تنها بوده که در درون یک ماده متخلخل تعبیه شده است و هیچ‌گونه آرایه‌ای از المان‌ها وجود ندارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در بررسی جاذب متخلخل مینا، همان‌طور که انتظار می‌رفت، ضریب جذب با افزایش فرکانس در محدوده مورد بررسی، افزایش می‌یابد، که معمولاً در فرکانس‌های بالاتر دارای

همان‌طور که انتظار می‌رود، هنگامی که این اتصالات به صورت عرضی باشند، باعث ایجاد بازتاب زیاد شده و در نتیجه باعث تضعیف مشخصه‌های جذب می‌شوند، البته از منحنی جذب به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از اتصال درونی بین المان‌ها منجر به افزایش میزان ضریب جذب نسبت به حالت عادی در فرکانس پایین شده است.

باید خاطر نشان کرد که با اینکه صحت منحنی جذب به دست آمده برای ماده مینا اثبات شده است اما به منظور تأیید نتیجه حاصل از قرار دادن المان‌های اعمالی در جاذب مینا نیاز به ارائه یک مدل تأیید شده در کارهای گذشته است، بدین منظور که نشان داده شود الگوی به دست آمده برای ضریب جذب در این کار درست باشد. با توجه به اینکه مطالعه‌ای مشابه با مطالعه صورت گرفته در این تحقیق از این منظر که به بررسی میزان اثرگذاری آرایه‌هایی از المان‌های اعمالی در جاذب متخلخل پرداخته شده باشد، وجود نداشته است، لذا امکان مقایسه دقیق با کارهای از قبل انجام شده وجود ندارد؛ اما برخی از فعالیت‌های انجام شده وجود دارند که به بررسی اثرات یک المان رزونانسی با ماده متخلخل پرداخته‌اند. از

منحنی تقریباً صافی است. با این حال در محدوده فرکانس پایین، ضریب جذب بسیار پایین است. به منظور افزایش عملکرد و کارایی جاذب در فرکانس‌های پایین، در گام نخست بلوک‌های سیلندری پر شده از فوم به صورت آرایه  $4 \times 4$  و به‌طور موازی با دیواره جاذب در درون جاذب متخلخل مینا اعمال شده‌اند. استفاده از بلوک‌ها هنگامی که از فوم پر شده بودند نتیجه مناسبی در میزان جذب نداشت؛ اما زمانی که سیلندرها با هوا پر شدند، ضریب جذب بیش از  $0/3$  در فرکانس‌های کمتر از  $400$  هرتز مشاهده شد. در ادامه بررسی‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داده شد که استفاده از پوسته‌های نازک‌تر به همراه حجم هوای بیشتر در ماده متخلخل (افزایش شعاع بیرونی سیلندرها) موجب بهبود قابل توجهی در میزان جذب در فرکانس پایین می‌شود. در پی اجرای هندسه خوب و مناسب، مواد اعمالی مختلفی همچون فولاد، آلومینیوم، سرب، شیشه و چوب صنوبر مورد آزمایش قرار گرفتند. تا این مرحله، نوع فوم به کار رفته به صورت پیش فرض انتخاب شده است، که دارای مقاومت در برابر جریانی معادل با  $215000$  رایل بر متر است. بدین ترتیب، انواع فوم‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند تا اثر مقاومت در برابر جریان بر مشخصه‌های جذب را

## ۶. مآخذ

مشاهده کنیم. نشان داده شد که مقادیر مقاومت در برابر جریان پایین، بهترین نتایج را برای هر دو محدوده فرکانسی پایین و میانی به‌وجود می‌آوردند. نتایج نشان داد که علاوه بر انتخاب مناسب ماده به همراه ضخامت و شعاع بیرونی درست، انتخاب فوم مناسب به کار رفته نیز دارای اهمیت زیادی در به‌دست آوردن مشخصه‌های جذب صدا در محدوده فرکانسی مربوطه است.

علاوه بر این، ارتباط یا اتصال بین المان‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشخص شد که میزان عملکرد ساختار در هنگامی که اتصالات در جهت امواج صوتی ورودی هستند بهتر از حالتی است که اتصالات به صورت عرضی بوده است.

همچنین در این مطالعه، نشان داده شد که با انتخاب المان رزونانس محلی اعمالی مناسب در جاذب متخلخل مبتنی بر فوم امکان افزایش کارایی در فرکانس پایین وجود خواهد داشت. از آنجایی که ساخت چنین ساختارهای فرامواد آکوستیکی بر این اساس امکان‌پذیر است، لذا می‌توان با مطالعات بیشتر در این زمینه به بهبود بیشتر میزان جذب در تمام فرکانس‌ها پرداخت.

- [1] Delany, M. E., and E. N. Bazley. "Acoustical properties of fibrous absorbent materials." *Applied acoustics*, Vol3, No. 2, 1970, pp.105-116.
- [2] Oliva, David, and Valtteri Hongisto. "Sound absorption of porous materials—Accuracy of prediction methods." *Applied Acoustics*, Vol.74, No.12, 2013, pp.1473-1479.
- [3] T. J. Cox and P. D'Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*, Spon Press, 2004.
- [4] Lagarrigue, Clément, Olivier Dazel, Jean-Philippe Groby, and Vincent Tournat. "Parametric study of a metaporous made of solid inclusions embedded in a rigid frame porous material." In *Acoustics 2012*, 2012.
- [5] Lagarrigue, C., J. P. Groby, V. Tournat, O. Dazel, and O. Umnova. "Absorption of sound by porous layers with embedded periodic arrays of resonant inclusions." *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.134, No.6, 2013, pp.4670-4680.
- [6] Groby, J-P., C. Lagarrigue, B. Brouard, O. Dazel, V. Tournat, and B. Nennig. "Using simple shape three-dimensional rigid inclusions to enhance porous layer absorption." *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.136, No.3, 2014, pp.1139-1148.

- [7] Groby, J-P., C. Lagarrigue, B. Brouard, O. Dazel, V. Tournat, and B. Nennig. "Enhancing the absorption properties of acoustic porous plates by periodically embedding Helmholtz resonators." *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.137, No.1, 2015, pp.273-280.
- [8] Nouh, M., O. Aldraihem, and A. Baz. "Wave propagation in metamaterial plates with periodic local resonances." *Journal of Sound and Vibration*, Vol.341, 2015, pp.53-73.
- [9] Boutin, Claude, and François Xavier Becot. "Theory and experiments on poro-acoustics with inner resonators." *Wave Motion*, Vol.54, 2015, pp.76-99.
- [10] Doutres, Olivier, Nouredine Atalla, and Haisam Osman. "Transfer matrix modeling and experimental validation of cellular porous material with resonant inclusions." *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.137, No.6, 2015, pp.3502-3513.
- [11] Assouar, Badreddine, Mourad Oudich, and Xiaoming Zhou. "Acoustic metamaterials for sound mitigation." *Comptes Rendus Physique*, Vol.17, No.5, 2016, pp.524-532.
- [12] Zhao, Honggang, Yang Wang, Dan Zhao, Jihong Wen, Y. Wai Lam, and Olga Umnova. "A low-frequency metasurface absorber based on Helmholtz resonators." *ICSV24, London, UK, 2017*, pp.23-27.
- [13] Jones, P. W. "PREDICTION of the Acoustic Performance of Small Poroelastic Foam Filled Mufflers: a Case Study." *Acoustics Australia*, Vol.38, No.2, 2010, pp.69-75.

پی نوشت:

- 
1. Noise
  2. Metamaterial
  3. Comsol Multiphysics
  4. Porous Absorber
  5. Delany
  6. Bazeley
  7. Finite Element Method
  8. Impedance Tube
  9. Transfer Matrix Method
  10. Specific Acoustic Impedance
  11. Lagarrigue